

波浪作用下水下航行体出水成功概率预报*

孙龙泉,任泽宇,李志鹏,马贵辉,赵建洲
(哈尔滨工程大学 船舶工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了实现实测波浪作用下水下航行体出水成功概率预报,为潜艇作战提供一种水下发射的快速预报方法,基于边界元方法建立了水下航行体出水姿态计算模型,对不同波浪条件下水下航行体出水姿态参数进行了计算。同时,将不同波浪条件下的出水姿态参数进行集成,形成了规则波浪数据库。以渤海湾某时间段的实测海况作为发射环境,建立符合瑞利分布的波高概率分布模型,将尾部触水俯仰角作为判定条件,对实测波浪下水下航行体出水成功概率进行预报。计算结果表明,在考虑最恶劣工况下,相对于静水条件下的出水俯仰角偏差随着波高的增加而减小;相同波高下,受到出水相位的影响,出水俯仰角偏差呈余弦变化规律。该预报方法对于潜艇作战判定发射时机具有一定参考价值,为水下发射的成功概率预报提供参考。

关键词:规则波浪;俯仰角;水下航行体;出水成功概率;边界元

中图分类号:TJ762.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)05-134-08

Prediction of probability of successful water-exit for underwater vehicles under wave action

SUN Longquan, REN Zeyu, LI Zhipeng, MA Guihui, ZHAO Jianzhou
(School of Marine Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to realize prediction of probability of successful water-exit for underwater vehicles under measured wave action and provide a rapid prediction method of underwater launch for submarine operations, the calculation model of water-exit attitude parameters of the underwater vehicle was established on the basis of the boundary element method. The water-exit attitude parameters of underwater vehicles under different wave conditions were calculated. Meanwhile, the water-exit attitude parameters under different wave conditions were integrated to form a regular wave database. The measured sea conditions in a certain period of time in the Bohai Bay were used as the launch environment, and a wave height probability distribution model conforming to the Rayleigh distribution was established. The pitch angle of the tail touching water was taken as the judging condition to realize the prediction of probability of successful water-exit for underwater vehicles under measured wave action. The calculation results show that, considering the worst conditions, the deviation of the water-exit pitch angle relative to the static water condition decreases with the increase of the wave height; under the same wave height, the deviation of the water-exit pitch angle shows a cosine variation law due to the influence of water-exit phase. The prediction method has certain reference value for submarine combat to determine the launch timing and provides a reference for the successful probability of underwater launch.

Keywords: regular wave; pitch angle; underwater vehicle; probability of successful water-exit; boundary element

潜射导弹发射技术中,对潜射导弹在不同的海浪环境下出水姿态参数的预报至关重要。潜射导弹点火技术主要分为两类:①导弹发射一段时间后在水中点火;②导弹出筒后依靠惯性在水中航行,离开水面时点火。对于水面点火的水下发射方式,如果出水姿态参数不够理想,导弹出水后的二次推进就无法调整弹体的轨迹,甚至会影响潜射导弹的成功出水,因此预报在波浪作用下导弹出水的姿态参数对导弹的成功发射有着至关重要的作用。而实际中波浪的运动是非常复杂

的,不同浪向、频率的波浪相互叠加造成了波浪属性的随机性,所以实现实测波浪下水下航行体出水成功的预报更有实际的意义。

水下航行体出水过程中受到波浪的扰动,二者之间的作用属于流体与固体之前的相互耦合作用,流固耦合数学模型主要包括理想势流模型和NS模型。由于NS模型具有耗时以及大幅度运动过程中网格易发生严重变形等缺点,本文的计算模型采用理想势流模型。倪宝玉^[1]、Longuet-higgins等^[2]就理想势流模型的可行性做出了详

* 收稿日期:2020-11-03

基金项目:国家基础加强计划技术领域基金资助项目(2019-JCJQ-JJ-293)

作者简介:孙龙泉(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,博士生导师,E-mail:sunlongquan@hrbeu.edu.cn

细的论述和验证,使在忽略黏性等因素后的数学模型得到了大大简化,提高了计算效率。对于理想势流模型的求解,目前的主要求解方法包括边界元方法和有限元方法。李帅^[3]、Li^[4-5]、Kashiwagi^[6]等使用边界元方法求解, Eatock^[7]、Ma^[8]等采用有限元方法求解。

然而,在水下航行体出水计算过程中,结构湿表面网格的重新布置以及自由面非线性边界条件的处理都显得十分复杂。为了解决这一系列复杂问题, Ma^[8]和 Yan^[9]等使用 QALE-FEM 方法,在整个出水计算过程中只生成一次复杂的结构化网格,在下一时间步直接计算到边界位置,大量节省了网格重置的时间。倪宝玉^[1]提出在水下航行体出水过程中,由于其高速运动,流场可以近似认为是准静态流场,可以绕射理论为基础,采用势流理论计算方法解决水下航行体出水问题。Xue^[10]、Miloh^[11]等就自由面非线性边界条件的问题,进行了计算模型和边界条件的简化,并与试验对比进行了有效性验证。

在水下航行体弹道计算方面,李代金^[12]、李体方^[13]等对航行体发射过程中弹道的数学模型进行了建立和分析,这些数学模型可用于潜射导弹等水下航行体的弹道计算,也为其他弹道模型的建立提供了参考依据。刘曜^[14]、姜涛^[15]通过解析法计算了水下航行体受到波浪作用后所受影响大小,并且通过轨迹方程得到了水下航行体运动姿态变化。王红萍等^[16]以自建的高精度数值波浪水池为基础,探究了波浪扰动力以及运动姿态参数的变化规律,为后续的弹道设计打下基础。尤天庆等^[17]针对航行体尾空泡对流体阻力影响的问题,通过求解雷诺平均的斯托克斯方程组,进行阻力计算研究,验证了弹道设计中考虑尾空泡的重要性。后续研究发现在航行体表面进行通气可以改善航行体表面的流体动力特征,从而提高水下航行体的出水成功概率。例如:刘涛涛^[18]、王克林^[19]等对气孔排气的气液两相流特性进行了研究,为排气孔的设计优化提供了参考;马贵辉^[20]、张耐民^[21]就通气空泡技术改善航行体水下弹道及出水姿态参数的有效性和可行性做了详细论述。

综上所述,虽然国内外的科研人员对水下航行体出水问题已经做了很多研究,但是大多需要借助计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)相关的商业软件,计算时间长、工作量大,没有办法形成规模计算,对海浪和 underwater 航行体相互作用的定性分析也存在困难,同时,缺少在实时海

况下的水下航行体出水成功概率的快速预报,在此方面无法为潜艇作战提供帮助。本文以边界元方法,在波浪和 underwater 航行体的流固耦合分析上做了一定程度的改进,大大缩短了计算时间,并且将计算结果纳入规则波浪数据中,以此为基础,能够在一定程度上实现实时海况下的航行体出水成功概率预报。

1 理论与方法

航行体在水下运动时,所受到的重力、浮力、流体力会影响水下航行体的原始轨迹并发生偏离。出水姿态参数是影响航行体出水成功与否的重要因素之一,如果出水弹道设计不好,潜射导弹出水后具有的角速度或偏转角可能会超出允许的控制范围,无法通过水面点火等方式调节平衡,从而直接导致发射失败^[22]。本文主要以俯仰角为例,研究波浪参数对尾部触水俯仰角的影响,并且以尾部触水俯仰角为判定依据进行水下航行体出水成功概率的预报。水下航行体运动姿态的示意图如图 1 所示,俯仰角 ϕ 为航行体轴线和水平方向的夹角。

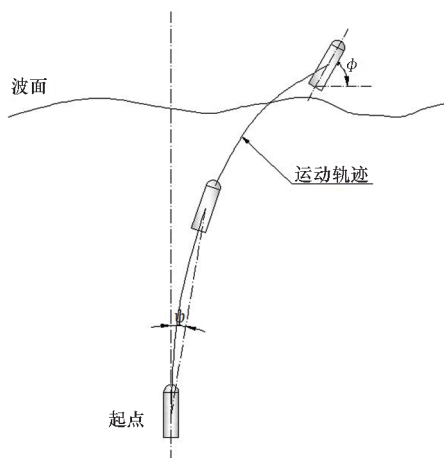


图1 水下航行体运动轨迹

Fig. 1 Trajectories of underwater vehicles

如图 1 所示,小尺度航行体在水中高速运动时,雷诺系数很大,惯性力的影响远大于黏性力的影响^[1],所以对水下航行体的数学模型做简化,能够实现规模计算。弹体在水下运动的数学模型简图如图 2 所示,航行体发射时有垂直向上的初始速度,同时加入了水平艇速的影响,上升过程中主要受到重力、流场惯性力和波浪力的作用。

如图 3 所示,以半球头回转体作为水下航行体,其中圆柱体长 L_0 ,直径 D_0 ,距头部顶端 $0.56L_0$ 处为质心。在航行体表面总速度势中计入波浪入射势,以考虑波浪对水下运动航行体的影响,这样

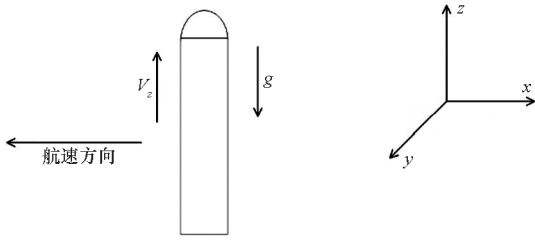
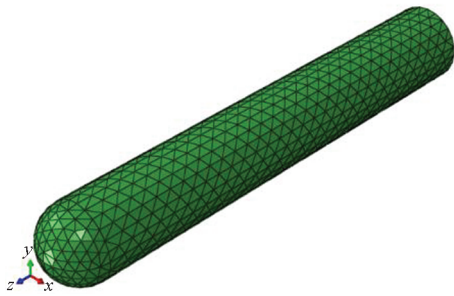


图 2 弹体出水坐标系

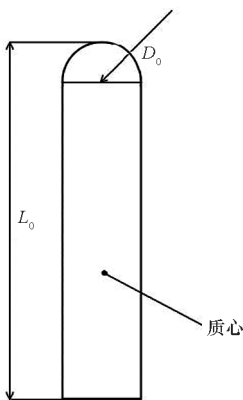
Fig. 2 Projectile body outlet coordinate system

可简化自由液面处网格的划分,将实际物理模型(图 1)简化为边界元计算模型(如图 3(a)所示)。模型中,航行体发射水深为 30 m,垂向速度为 25 m/s,具有 1.5 m/s 的向弹体坐标系 x 轴负方向(艇速方向)的初始艇速。因为模型中不涉及出筒阶段,为考虑航行体水下发射实际情况,在数值模型中设置水下航行体初始的俯仰角速度为 ω_0 ,初始俯仰角为 ϕ_0 。



(a) 航行体网格

(a) Grid of the vehicle



(b) 结构示意

(b) Structural diagram

图 3 圆柱体模型

Fig. 3 Cylindrical model

如图 3(a)所示,水下航行体结构表面用三角形网格进行划分,计算过程中将其视为刚体。模型中,设水下航行体在水中运动时为完全浸湿状态,忽略空泡等强非线性条件影响。

1.1 控制方程

在无旋、无黏假设下的理想势流理论中,航行体总速度势为:

$$\Phi = \varphi + \varphi_i \quad (1)$$

式中, φ 为结构表面的扰动势, φ_i 为波浪入射势。

航行体总速度势满足拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (2)$$

结构表面满足不可穿透条件:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial \mathbf{n}} \quad (3)$$

式中, \mathbf{n} 为物面法向向量, \mathbf{V} 为速度向量。

流场无穷远处满足:

$$\nabla \Phi \rightarrow \nabla \varphi_i \quad (4)$$

流场域内任意一点的速度势都可以用其边界上的速度势及其法向导数来确定^[23],所以需要采用边界积分方法^[24]求解流场扰动势 φ :

$$\varphi(\mathbf{p}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left[G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \cdot \frac{\partial \varphi(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{n}_q} - \varphi(\mathbf{q}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_q} G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \right] dS \quad (5)$$

式中, S 为航行体表面边界面, \mathbf{p} 和 \mathbf{q} 分别为场点和源点。自由空间的格林函数 $G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = 1/|\mathbf{R} - \mathbf{r}|$, \mathbf{R} 和 \mathbf{r} 分别是场点和源点的位置矢量。

将求解得出的速度势代入非定常的伯努利方程中,得到式(6),将由式(5)求得的扰动势 φ 代入式(6)中求得水下航行体运动过程中所受压力,同时计及流场静压和大气压力。

$$P_d = -\rho \left(\frac{D\varphi}{Dt} - \mathbf{V} \cdot \nabla \varphi + 0.5 \cdot \nabla \varphi^2 + gh \right) + P_0 \quad (6)$$

式中: P_0 为大气压,水下航行体出水时其表面将只承受大气压力; h 为距离水面的高度; ρ 为海水密度。

水下航行体的结构动力学方程如式(7)所示:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_s \mathbf{x} = \mathbf{f}_s - \mathbf{I}_{sf} \mathbf{A}_f P_d \quad (7)$$

式中, \mathbf{M}_s 为结构质量矩阵, \mathbf{K}_s 为刚度矩阵, \mathbf{f}_s 为结构外力, \mathbf{I}_{sf} 为联系结构单元与流体边界单元的转换矩阵, \mathbf{A}_f 为单元面积矩阵。

将水下航行体表面新的单元、节点位置信息输入到流场动压力计算程序之中,计算在新时间步内结构表面各单元所受压力大小,然后更新节点、单元信息,循环计算到要求时间步长为止。

1.2 波浪入射势

本文计算工况中,波高相对于水深为小量,所以可以采用小振幅波理论对水下航行体在规则波浪中的运动进行分析。小振幅波模型如图 4 所

示,图中, λ 为波长, H 为波高, A 为波幅。

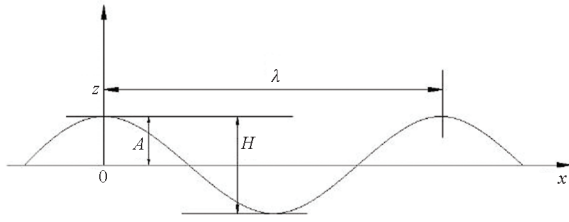


图4 小振幅波波面

Fig.4 Small amplitude wave surface

小幅波面方程如式(8)所示:

$$\eta(x, t) = A\cos(kx - \omega t + \varepsilon) \quad (8)$$

式中, ω 代表波浪频率, k 为波数, ε 为初相位。

小振幅波理论中,水质点运动缓慢,故自由表面非线性运动和动力边界条件可以简化为线性边界条件。因此,波浪向前传播时,波浪的入射势为:

$$\varphi_i = \frac{gA}{\omega} e^{-kz} \sin(kx - \omega t + \varepsilon) \quad (9)$$

若波浪的传播方向和坐标系之间存在夹角 γ ,则可以通过坐标转换得到新的波浪数学模型:

$$\begin{cases} \varphi_i = \frac{gA}{\omega} e^{-kz} \sin[k(x\cos\gamma + z\sin\gamma) - \omega t + \varepsilon] \\ \eta(x, t) = A\cos[k(x\cos\gamma + z\sin\gamma) - \omega t + \varepsilon] \end{cases} \quad (10)$$

当艇速水平运动方向和波浪传播方向相同时为顺浪,此时 $\gamma = 180^\circ$;当方向相反时为逆浪,此时 $\gamma = 0^\circ$ 。

1.3 有效性验证

为验证算法的有效性,将在开放水池所测得的试验结果与数值模拟结果对比。试验工况为:初始艇速 $3.78\omega_0 L_0$,垂直速度 $63.01\omega_0 L_0$,波面状态为静水。

将俯仰角 ϕ 进行无量纲化处理得到无量纲俯仰角 $\bar{\phi}$:

$$\bar{\phi} = \frac{\phi}{\phi_0} \quad (11)$$

将计算所得的水下航行体头部触水俯仰角和尾部触水俯仰角,同试验结果进行对比,来验证算法的有效性。对比结果如表1所示,头部触水俯仰角和尾部触水俯仰角的相对误差较小,可以认为在姿态计算上算法有效。

表1 水下航行体出水俯仰角 $\bar{\phi}$ 对比

Tab.1 Underwater vehicle water elevation angle contrast

俯仰角	数值模拟	试验结果	误差率/%
头部触水俯仰角	0.88	0.86	2.33
尾部触水俯仰角	0.71	0.74	-4.05

为验证波浪力的有效性,采用海洋工程中常用的经验公式进行比较。对于与波长相比尺度较小的细长弹体(弹体 $D/\lambda < 0.2$)的波浪力计算,在工程设计中广泛采用莫里森公式^[25]。该公式假定,柱体的存在对波浪运动无显著影响,认为波浪对柱体的作用主要是黏滞效应和附加质量效应。

具体到本文模型中,三级浪的谱峰周期 $T = 7.5$ s,波长 $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} = 87.73$ m,此时 $\frac{D}{\lambda} = \frac{2.2}{87.73} = 0.025 \ll 0.2$,符合莫里森的应用条件。竖直圆柱单位长度上受到的水平波浪力为:

$$f_H = f_D + f_I = \frac{1}{2} C_D \rho S_A u_x |u_x| + C_M \rho V_0 \frac{du_x}{dt} \quad (12)$$

式中, u_x 和 $\frac{du_x}{dt}$ 分别为波浪水质点的水平速度和水平加速度; S_A 为单位柱高垂直于波向的投影面积; C_D 为垂直于柱体轴线方向的拖曳力系数; C_M 为质量系数。

由于莫里森公式一般应用于静态或者准静态的结构物波浪力计算当中,所以本文在校核势流方法计算结果有效性时,假定柱体静止于水面附近,然后分别用莫里森公式和势流方法计算柱体单位长度所受波浪力大小,计算结果如表2所示。在水面处,应用势流方法比应用莫里森公式计算相比偏小,3级浪和5级浪误差分别为6.71%和9.56%,可认为计算结果符合波浪力有效性要求。结合上述对弹体出水俯仰角的验证结果,本文所建立的基于势流理论的航行体出水姿态计算模型符合有效性的要求,可以应用到本文的计算当中。

表2 莫里森公式和势流方法计算的单位长度波浪力对比
Tab.2 Comparison of wave force per unit length calculated by the Morison formula and potential flow method

浪级	有义波高/m	波长/m	莫里森公式计算结果/(N/m)	势流方法结果
三级浪	0.88	87.83	2 524.37	2 354.98
五级浪	3.25	146.80	6 644.06	6 008.89

2 实时波浪预报方法

2.1 实际海况分析

实际海浪的波面运动是一种十分复杂的自然现象,受到自身重力、海面附近风速、风向、水面以

下地形地貌特点,甚至是地球自转偏向力、潮汐作用等诸多复杂因素的影响,从而使其波动规律表现出极大的随机性,增加了对水面附近舰船和水中航行体的运动进行准确预测的困难程度。图 5 所示为渤海湾某一海域在台风下的 30 min 波面时历曲线,本文以该波浪作为实测海况进行水下航行体的出水姿态成功概率预报。

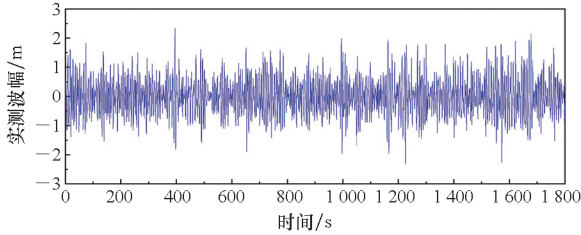


图 5 波面 30 min 的时历曲线

Fig. 5 30-minute time-history curve of the wave surface

图 5 中波面高度随时间不规则变化,波峰极大值隔一段时间出现一次,满足了波浪随机性的要求。按惯例,一个波浪定义为相邻两次上跨零(上穿零)间的信号部分,波高定义为最小值与最大值之间的垂直距离。这样,在记录时间内,得到了高为 $H_i (i=1, 2, \dots, N)$ 、周期(上跨)为 T_i 的 N 个波浪。可以从中得出平均值 \bar{H} 和最大值 H_{\max} 以及有义波高^[25] $H_{1/3}$ 。对图 5 波浪数据进行逐波分析,并将所得结果进行光滑得到的波高统计数据如图 6 所示,平均波高 $\bar{H} = 0.78$ m,最大波高 $H_{\max} = 2.33$ m,有义波高 $H_{1/3} = 1.31$ m。

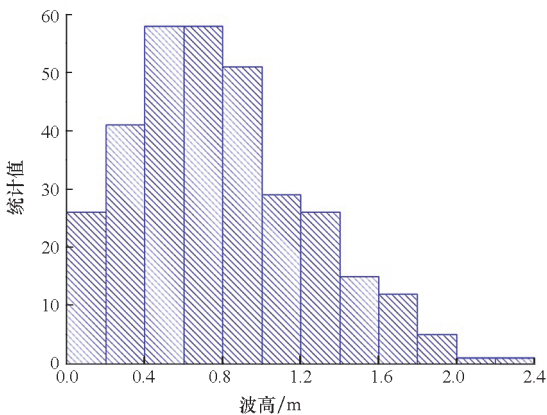


图 6 实测波浪的波高统计直方图

Fig. 6 Statistical histogram of wave height of measured waves

为验证实测波高的分布规律,将实测波高进行累计概率统计,得到如图 7 所示的实测波高的概率分布曲线。同时为得到理论上的波高概率分布曲线,参考式 (13) 得到瑞利分布^[25] 下的波高概率分布,并将所得结果与实测波高概率分布进

行对比,对比结果如图 7 所示,发现统计值和理论值的概率分布曲线拟合良好,认为波高的分布符合瑞利分布。

$$\begin{cases} f(H) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{H^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H^2}\right)^2\right] \\ P = \int_0^{H_{\max}} f(H) dH = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H^2}\right)^2\right] \end{cases} \quad (13)$$

式中, $f(H)$ 为波高概率密度, P 为对应的累计概率分布, H_{\max} 为符合边界要求的最大波高。

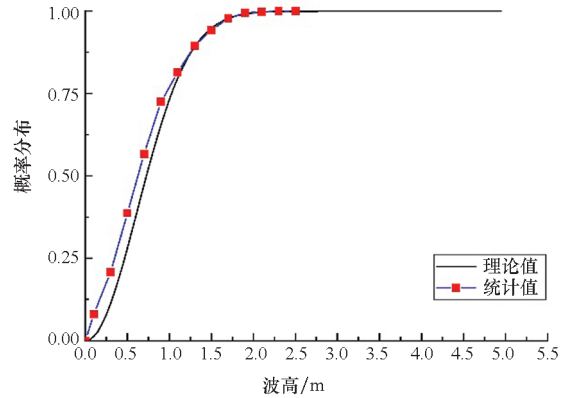


图 7 理论值和统计值对比

Fig. 7 Comparison of simulated values and statistical values

2.2 波浪参数对出水俯仰角的影响

波浪力可分为两部分^[16, 22]: ①由波浪压力场引起的压差力; ②由于波浪质点的轨迹速度引起的附加惯性力。波浪参数通过影响波浪力的大小从而影响水下航行体的出水姿态参数。波高主要影响波浪力的幅值,对航行体出水姿态参数有着直接影响;波浪的周期 T 、初相位 ε 和浪向通过改变水下航行体出水相位来影响波浪质点的轨迹速度,改变附加惯性力,从而影响出水姿态参数。

将不同工况下的尾部触水俯仰角和静水下尾部触水俯仰角作差比得到俯仰角偏差值 β :

$$\beta = \frac{(\bar{\phi}_2 - \bar{\phi}_1)}{\bar{\phi}_1} \quad (14)$$

其中, $\bar{\phi}_1$ 表示静水条件下尾部触水时的俯仰角, $\bar{\phi}_2$ 表示不同工况下尾部触水时的俯仰角。

图 8 为不同波高下(出水相位为波峰位置,浪向为逆浪)航行体尾部触水俯仰角偏差值的变化曲线,图中曲线值 $\beta < 0$, $\bar{\phi}_2 < \bar{\phi}_1$,该工况下对尾部触水俯仰角的影响呈负影响,不利于发射成功;随着波高的增加,俯仰角偏差值近似呈线性增加,说明随着波高的增加,波浪力也逐渐增加并对航行体尾部触水俯仰角的影响越来越大;该曲线节点连接光滑,不存在高阶突变,这为分段线性差值

进行内插取值提供了必要条件。

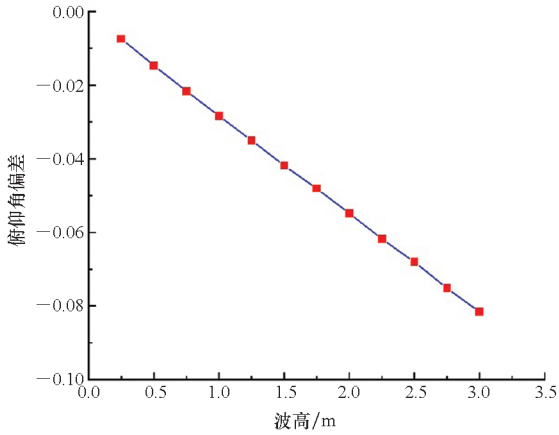


图8 不同波高下的俯仰角偏差值

Fig.8 Deviation of pitch angle under different wave height

图9为不同出水相位(计算工况为 $H = 1.88\text{ m}$,浪向为逆浪)下的俯仰角偏差值的变化曲线,在图中 $\beta = 0$ 处做分界线,分界线之上 $\bar{\phi}_2 > \bar{\phi}_1$,出水相位对尾部触水俯仰角呈正影响(有利于发射成功);分界线之下 $\bar{\phi}_2 < \bar{\phi}_1$,出水相位对尾部触水俯仰角呈负影响(不利于发射成功)。

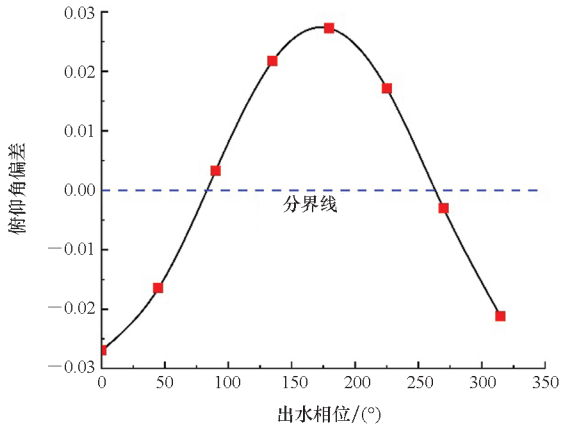


图9 不同出水相位下的俯仰角偏差值

Fig.9 Deviation of pitch angle under different water-exit phase

通过图9可以发现,在该计算工况下,俯仰角偏差随着出水相位呈余弦变化规律,因为随着出水相位的变化,流体质点的轨迹速度是不同的,流体质点和波浪的传播存在相对运动,受到波浪相位的影响,流体质点运动速度的方向近似呈余弦变化。浪流的相对运动如图10所示,在波峰位置,波浪传播方向和流体质点的运动方向相同;在波谷位置,波浪传播方向和流体质点的运动方向相反。波峰位置和波谷位置浪流相对运动的不同,造成两个相位下航行体尾部触水俯仰角相反的情况:波峰位置出水,流体

质点始终沿着 x 轴正方向运动^[15],此时弹体所受的附加惯性力偏向于航行体俯仰方向,波浪对尾部触水俯仰角的负影响达到最大;波谷位置出水,流体质点会沿 x 轴负方向运动^[15],此时弹体所受的附加惯性力对航行体俯仰运动呈抑制作用,波浪对尾部触水俯仰角的正影响达到最大。

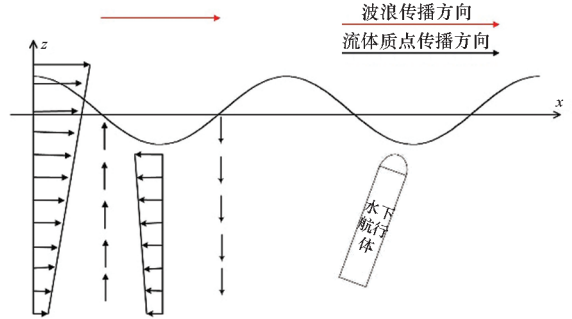


图10 浪流相对运动

Fig.10 Relative motion of waves and fluid particles

所以相同波高下,由于波浪质点轨迹速度的不同,受到附加惯性力的影响,航行体出水姿态也会不同。为了实现水下航行体出水成功概率的快速预报,取相同波高下不同出水相位中最恶劣的工况进行出水成功概率预报,预报方法及流程如2.3节所述(以尾部触水俯仰角 $\bar{\phi}$ 为例,最恶劣情况为出水俯仰角 $\bar{\phi}$ 最小时,在本文中所对应最恶劣的工况为波峰位置出水)。

2.3 水下航行体出水成功概率预报

在潜艇实际海上作战中,海况是复杂多变的,在进行潜射导弹发射之前,需要对该海况下的发射成功概率进行快速预报。本小节针对此工程背景提出一种水下航行体出水成功概率的快速预报方法。

1) 规则波浪数据的建立:为了提供基本的数据参考,将各个工况所算得的尾部触水俯仰角进行集成,形成规则波浪数据库。通过2.2节分析可知,相同波高下,俯仰角的变化受到出水相位的影响,在某一出水相位会出现最恶劣情况(即尾部触水俯仰角最小)。所以,在生成规则波浪数据库时,计算水下航行体在不同波高下最恶劣的工况即尾部触水时的最小俯仰角纳入数据库中。波高的计算范围参考北半球大洋海浪年平均统计资料,浪向取为逆浪,波高取变化范围 $[0, 14]\text{ m}$,波高间隔 0.5 m ,每个工况计算所得的尾部触水俯仰角纳入规则波浪数据库中。通过图8可以发现随着波高的增加,俯仰角偏差值近似呈线性增加,所以,对于未曾计算到的波高(比如 $H =$

0.3 m),可采用分段线性插值得到出水俯仰角。该数据库用于后续水下航行体出水成功的判定。

2)实时波浪分析:以 2.1 节所提到的实测波浪为例,分析方法采用逐波分析法,得到实时波浪的平均波高 \bar{H} 。

3)概率预报模型的建立:波高 H 的分布服从瑞利分布^[25],所以参考式(13)建立波高分布概率预报模型。

4)通过边界值判断出水成功概率:实际水下发射过程中,出水姿态参数是有限制的,以俯仰角为例,当俯仰角超过限定值时,潜射导弹出水后就无法通过二次推进等方式进行自我调整,会导致发射失败。通过设置尾部触水俯仰角边界值(比如 $\bar{\phi}=0.61$),由 2.2 节可知,在只考虑最恶劣工况的情况下,尾部触水俯仰角随着波高的增加而降低,所以可在规则波浪数据库中取得满足边界值的最大波高 H_{max} ,因为当波高 H 满足条件 $H < H_{max}$ 时,水下航行体的尾部触水俯仰角也满足边界条件的要求,认为在该波高 H 下可以成功出水。通过式(13)进行概率积分即可得到在该实测波浪下满足边界条件的波高 H 的概率分布,即水下航行体的出水成功概率 P 。

该实测海况下概率分布如图 11 所示, H_{max} 为满足要求的最大波高, $0 \sim H_{max}$ 为所满足的波浪范围,通过概率分布函数即可得到水下航行体的出水成功概率。水下航行体出水成功概率预报的流程如图 12 所示。

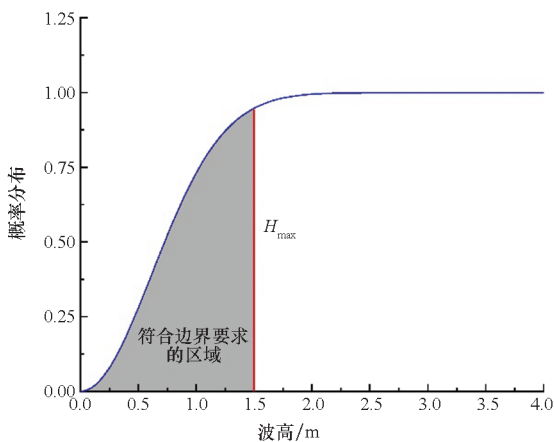


图 11 波高的概率分布

Fig. 11 Probability distribution of wave height

由于本文所考虑的都最为恶劣的情况,而且静水情况下尾部触水的俯仰角度 $\bar{\phi}$ 为 0.69,所以能够进行有效预报的尾部触水俯仰角边界值受到限制,这也是该预报方法需要改进的地方。表 3 展示了在本文的初始发射工况下,该实测海况下水下航行体出水成功概率的预报结果。

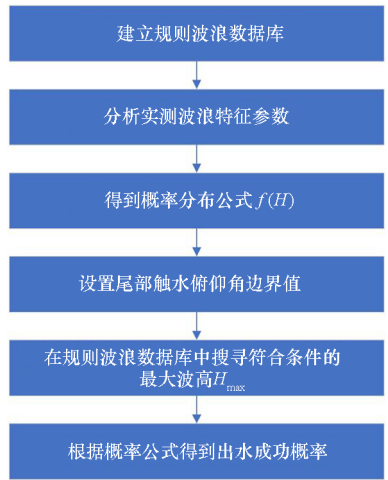


图 12 水下航行体出水成功概率预报流程

Fig. 12 Successful probability prediction process of underwater vehicles coming out of water

表 3 水下航行体出水成功概率预报结果

Fig. 3 Prediction of success probability of underwater vehicles coming out of water

尾部触水俯仰角边界值	0 ~ 0.6	0.61	0.62	0.63	0.64
出水成功概率	大于 99%	96%	87%	78%	66%

3 结论

本文通过边界元计算方法实现了对水下航行体水下发射的数值模拟,对水下航行体在规则波浪下的出水姿态参数形成了规模计算,从而建立了规则波浪数据库。计算结果表明,在考虑最恶劣工况下,出水俯仰角偏差随着波高的增加而减小;相同波高下,出水俯仰角偏差随着出水相位呈余弦变化,俯仰角极值发生在波峰和波谷位置。

以尾部触水时的俯仰角作为水下航行体能否成功出水的判定,在认为波浪的波高符合瑞利分布的前提下,实现了在实测海浪下对水下航行体出水成功概率的预报。基于规则波浪数据库下的水下航行体出水成功概率预报方法具有如下特性:

1)快速性:该预报方法是从已经计算完成的数据库中抓取边界值,利用波浪分布的概率模型对出水成功概率进行计算,用时短暂,对于潜艇作战判定发射时机具有一定参考意义。

2)灵活性:该方法是参考北半球大洋海浪年平均统计资料进行工况划分,在实际应用时,可以参考不同海域的统计资料进行计算以形成数据库,进行预报的弹体模型也可以根据实际进行更换。

3)实用性:由于计算结果的线性变化,该方

法只需要一定数量的原始数据,数据获取容易而且精度较高,具有一定的实用性。

参考文献 (References)

- [1] 倪宝玉. 回转体出水的全非线性水动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
NI B Y. Fully nonlinear hydrodynamics of the effluent of a rotating body[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [2] LONGUET-HIGGINS M S, GOKELET E D. The deformation of steep waves on water-I. A numerical method of computation[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1976, 350(1660): 1-26.
- [3] 李帅, 张阿漫, 韩蕊. 水中高压脉动气泡水射流形成机理及载荷特性研究[J]. 力学学报, 2019, 51(6): 1666-1681.
LI S, ZHANG A M, HAN R. The mechanism of jetting behaviors of an oscillating bubble[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(6): 1666-1681. (in Chinese)
- [4] LI Z P, SUN L Q, YAO X L, et al. Numerical investigation of axisymmetric bubble dynamics from a submerged circumferential slit on the cylinder[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 125: 103213.
- [5] LI Z P, SUN L Q, XIAO W, et al. Three-dimensional numerical analysis of near-wall single-orifice ventilated bubble dynamics[J]. Ocean Engineering, 2019, 186: 106066.
- [6] KASHIWAGI M. Full-nonlinear simulations of hydrodynamic forces on a heaving two-dimensional body[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1996, 196(180): 373-381.
- [7] WU G X, EATOCK T R. Finite element analysis of two-dimensional non-linear transient water waves[J]. Applied Ocean Research, 1994, 16(6): 363-372.
- [8] MA Q W, YAN S. Quasi ALE finite element method for nonlinear water waves[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 212(1): 52-72.
- [9] YAN S, MA Q W. Numerical simulation of fully nonlinear interaction between steep waves and 2D floating bodies using the QALE-FEM method[J]. Journal of Computational Physics, 2007, 221(2): 666-692.
- [10] XUE M, YUE D K P. Nonlinear free-surface flow due to an impulsively started submerged point sink[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 364: 325-347.
- [11] MILOH T. A note on impulsive sphere motion beneath a free-surface[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2001, 41: 1-11.
- [12] 李代金, 罗凯, 党建军, 等. 超空泡水下航行器空间运动建模与弹道仿真[J]. 兵工学报, 2012, 33(8): 956-961.
LI D J, LUO K, DANG J J, et al. Kinematic modeling and trajectory simulation for underwater supercavitating vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(8): 956-961. (in Chinese)
- [13] 李体方, 张志峰. 海浪作用下的水下弹道数学模型[J]. 弹道学报, 1999, 11(3): 47-51.
LI T F, ZHANG Z F. The emulation development for the motion of submerging missile under wave force[J]. Journal of Ballistics, 1999, 11(3): 47-51. (in Chinese)
- [14] 刘曜. 波浪对运载器出水姿态角的影响[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(3): 32-34.
LIU Y. Wave effect on a submerged missile capsule traveling near-surface[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(3): 32-34. (in Chinese)
- [15] 姜涛. 波浪模拟及其对航行体出水过程的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
JIANG T. The simulation of wave and its effects on the exceeding water process of an underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [16] 王红萍, 李智生, 阎肖鹏. 波浪对水下航行体运动参数影响分析[J]. 声学技术, 2016, 35(4): 26-31.
WANG H P, LI Z S, YAN X P. Analysis of wave and its effects on motion parameters of an underwater vehicle[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(4): 26-31. (in Chinese)
- [17] 尤天庆, 王占莹, 权晓波, 等. 尾空泡对水下航行体流体阻力影响数值计算分析[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(4): 64-68.
YOU T Q, WANG Z Y, QUAN X B, et al. Numerical analysis of the tail cavity effect on underwater vehicle hydrodynamic damping force[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(4): 64-68. (in Chinese)
- [18] 刘涛涛, 王国玉, 张耐民, 等. 绕多孔孔板通气体与液体两相横射流旋涡特性分析[J]. 兵工学报, 2017, 38(7): 1375-1384.
LIU T T, WANG G Y, ZHANG N M, et al. Analysis of vortex dynamics of gas-liquid two-phase crossflows around a porous plate[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(7): 1375-1384. (in Chinese)
- [19] 王克林. 小孔射流流场气液多相流动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
WANG K L. Research on gas-liquid multiphase flow characteristics of pinhole jet flow field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [20] 马贵辉. 等压排气改善潜射航行体出水特性及稳健性机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
MA G H. Mechanisms of improving the water exit characteristics and robustness of underwater launched vehicles with pressure-equalizing exhaust[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [21] 张耐民. 水下航行体边界层通气流体力及弹道特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
ZHANG N M. Research on multiphase hydrodynamic and attitude of submarine launched vehicle with boundary layer ventilation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [22] 郑帮涛. 潜射导弹出水过程水弹道及流体动力研究进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(5): 8-11.
ZHENG B T. Overview on hydroballistics and fluid dynamics of submarine-based missiles[J]. Missiles and Space Vehicles, 2010(5): 8-11. (in Chinese)
- [23] 尤天庆, 权晓波, 刘元清, 等. 基于势流理论的尾空泡对航行体表面压力影响研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(9): 1182-1188.
YOU T Q, QUAN X B, LIU Y Q, et al. Effects of tail cavity on pressure distribution of underwater vehicle based on potential flow theory[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(9): 1182-1188. (in Chinese)
- [24] 权晓波, 尤天庆, 张晨星, 等. 水下垂直发射航行体尾空泡振荡演化特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(8): 1728-1734.
QUAN X B, YOU T Q, ZHANG C X, et al. Evolution properties of tail cavity oscillation of underwater launched vehicle[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(8): 1728-1734. (in Chinese)
- [25] 俞寿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.
YU L X. Random wave and its applications to engineering[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1992. (in Chinese)